

В.А. Большаков<sup>1</sup>, В.М. Алексахин<sup>1</sup>

## ПОВЫШЕНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЖАТИИ ПОСЛЕ НИЗКОСКОРОСТНОГО УДАРА УГЛЕПЛАСТИКОВ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫХ ИНФУЗИОННЫМ МЕТОДОМ ФОРМОВАНИЯ\*

*В настоящее время в РФ детали из ПКМ авиационного назначения изготавливаются автоклавным методом по растворной технологии. За рубежом используются в основном безрастворные технологии на расплавных связующих. Безавтоклавные методы формования, такие как инфузионные (пропитка под давлением и вакуумная пропитка), позволяют существенно снизить себестоимость изделий из ПКМ. Вакуумная пропитка представляет особый интерес, так как не требует применения сложного технологического оборудования. Для обеспечения работоспособности материала в условиях, предусматривающих возможность низкоскоростного удара, введение термопластичных добавок в пакет наполнителя и лакирующих слоев существенно повышает стойкость к ударным повреждениям ПКМ, изготавливаемых методом инфузионного формования.*

**Ключевые слова:** углепластики, инфузионное формование, остаточная прочность при сжатии после удара.

V.A. Bol'shakov<sup>1</sup>, V.M. Aleksashin<sup>1</sup>

## A WAY TO INCREASE THE RESIDUAL COMPRESSION STRENGTH AFTER LOW-SPEED IMPACT OF CFRPS PRODUCED BY VACUUM INFUSION TECHNOLOGY

*In the Russian Federation, aviation-purposed parts and components are manufactured by the solvent impregnation in autoclave. However, foreign companies usually use the non-solvent techniques based on melting resins. Non-autoclave molding technologies (such as infusion molding or vacuum impregnation) allow one to decrease sufficiently production costs of CFRPs. Vacuum impregnation is the matter of a particular interest because the usage of complex production equipment can be eliminated. CFRP parts and units made by means of infusion molding possess high impact resistance due to cladding layers and introduction of thermo-plastic additives in the reinforcement stack. It provides an improvement of serviceability of such materials in case of low speed impact loading.*

**Keywords:** carbon fiber-reinforced plastic, infusion molding or vacuum and pressure impregnation, residual compression strength after impact.

---

<sup>1</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

При обзоре существующих патентов и литературных источников выяснилось, что способы инфузионного формования применяются и совершенствуются почти в каждой промышленно развитой стране мира.

---

\* В работе принимала участие Н.В. Антюфеева.

Основными направлениями исследовательских работ являются:

- улучшение качества получаемого изделия;
- удешевление процесса производства ПКМ;
- упрощение процесса формования;
- усложнение структуры получаемых ПКМ и расширение области их применения.

В результате анализа литературных источников выявлены следующие тенденции развития [1, 2] данного объекта техники:

- улучшение свойств полученных изделий (остаточная прочность при сжатии после удара, пористость, прочность) благодаря улучшению конструкции формы, введению дополнительных слоев или прошивок, использованию нанокремниевых частиц, новых видов связующих и наполнителей;
- снижение трудоемкости процесса с соответствующим удешевлением продукции путем использования передовых технологий в области формования;
- усложнение конфигурации получаемых изделий, упрощение процесса формования благодаря использованию передовых технологий в области формования и новых приспособлений.

Проведено сравнение типовых эпоксидных связующих для пропитки под давлением (RTM), вакуумного формования (VM) [3] и углепластиков на их основе.

Для вакуумного формования (VM) [4, 5] и для пропитки под давлением (RTM) изготовлены полимерные эпоксидные связующие производства ВИАМ и исследованы их свойства:

- вязкость при температуре  $60 \pm 1,0^\circ\text{C}$  (для связующего RTM – по ГОСТ 25271 и ТУ 1-595-12-1106–2009, для связующего VM – по ГОСТ 25271 и ТУ 1-595-12-1195–2011);
- время желатинизации при температуре  $120 \pm 2^\circ\text{C}$  (для связующего RTM – по ТУ 1-595-12-1106–2009, для связующего VM – по ТУ 1-595-12-1195–2011);
- температура стеклования (для связующего RTM – по ТУ 1-595-12-1042–2008, для связующего VM – по ТУ 1-595-12-1195–2011).

Установлено, что для связующего, используемого при вакуумном формовании:

- время желатинизации при температуре  $120 \pm 2^\circ\text{C}$  составляет 20 мин;
- вязкость при температуре  $60 \pm 1,0^\circ\text{C}$ : 0,2 Па·с;
- температура стеклования  $170^\circ\text{C}$ .

Для связующего, используемого при пропитке под давлением:

- время желатинизации при температуре  $120 \pm 2^\circ\text{C}$  составляет 21 мин;
- вязкость при температуре  $60 \pm 1,0^\circ\text{C}$ : 0,4 Па·с;
- температура стеклования  $180^\circ\text{C}$ .

Для определения оптимального режима формования методами RTM и VM [6] исследована кинетика отверждения, определена энергия активации по ASTM E 698-2000 и порядок реакции по ASTM E 2041-2001 связующих при трех скоростях нагрева. По результатам исследований выявлены оптимальные режимы формования ПКМ на основе углеродного наполнителя – равнопрочной углеродной ткани фирмы «Porcher».

На основе исследованных связующих и углеродного наполнителя фирмы «Porcher» методами RTM и VM изготовлены опытные образцы ПКМ с использованием термопластичной нити из полисульфона, которой прошивался полученный пакет наполнителя, и без ее использования [7].

В результате проведенных исследований получены следующие результаты [8]:

- прочность при сжатии до удара (по ГОСТ 25.602–80) для ПКМ, изготовленных по технологии RTM, составила 457–463 МПа; для ПКМ, изготовленных по технологии VM: 409–447 МПа;

– остаточная прочность при сжатии после воздействия низкоскоростного удара (6,67 Дж на 1 мм толщины) по ASTM D 7137 для образцов ПКМ с квазиизотропной схемой составила 158–161 МПа (RTM технология) и 138–140 МПа (VM технология);

– толщина монослоя для этих ПКМ составила 0,2 мм.

Проведены исследования ПКМ (экспериментальные образцы), изготовленных по технологии вакуумного формования (VM), на основе типового связующего и различных углеродных наполнителей фирм «Porcher» и «Тогау». При изготовлении использованы лакирующие слои на основе органической ткани и стеклоткани, а также термопластичные добавки в виде полиэфирной нити, которой был прошит пакет наполнителя. Проведено исследование их остаточной прочности при сжатии до удара (по ГОСТ 25.602–80). Установлено, что величина прочности при сжатии ПКМ до удара составила:

– на основе наполнителя фирмы «Porcher» и лакирующих слоев из органической ткани: 446–450 МПа;

– на основе углеродной ткани фирмы «Тогау» и лакирующих слоев из органической ткани: 425–493 МПа;

– на основе углеродной ткани фирмы «Тогау» и лакирующих слоев из стеклоткани: 319–386 МПа,

– на основе углеродной ткани фирмы «Тогау» (пакет наполнителя прошит полиэфирной нитью): 360–396 МПа.

Проведено исследование остаточной прочности при сжатии после удара образцов ПКМ с квазиизотропной схемой армирования на углеродных наполнителях из тканей фирм «Тогау» и «Porcher» с использованием лакирующих слоев из органической ткани Русар.

Установлено, что величина остаточной прочности при сжатии после удара (по ММ 1.595-11-113–2001) составила:

– для ПКМ, изготовленного на основе наполнителя фирмы «Porcher» и лакирующих слоев на основе органической ткани, –  $\sigma_{в.сж.у}=150–152$  МПа;

– для ПКМ, изготовленного на основе наполнителя фирмы «Тогау» и лакирующих слоев на основе органической ткани, –  $\sigma_{в.сж.у}=169–172$  МПа.

Проведено исследование влияния способов совмещения компонентов с углеродным наполнителем на остаточную прочность при сжатии после удара образцов ПКМ, изготовленных методом вакуумного формования (VM):

– для ткани фирмы «Porcher» с прошивкой термопластичной нитью из полисульфона  $\sigma_{в.сж.у}=138–140$  МПа;

– для ткани фирмы «Porcher» и лакирующих слоев на основе органической ткани Русар  $\sigma_{в.сж.у}=150–152$  МПа;

– для ткани фирмы «Тогау» и лакирующих слоев на основе органической ткани Русар  $\sigma_{в.сж.у}=169–172$  МПа.

Методом вакуумного формования (VM) изготовлены экспериментальные образцы их ПКМ с квазиизотропной схемой армирования [+45/0/-45/90]<sub>s</sub> на основе ранее исследованного связующего для вакуумного формования и углеродной ткани (углеродное волокно T-800-NB) с использованием лакирующих слоев на основе органической ткани. Проведено исследование этих образцов [9, 10]:

– температура стеклования углепластика составила 154,1°С;

– модуль упругости при 30°С составляет ~45 ГПа.

Проведено исследование их остаточной прочности при сжатии до удара по ГОСТ 25.602–80 (на испытательной машине «Тиратест-2300»). Установлено, что величина прочности при сжатии ПКМ до удара составляет 620 МПа. Проведено исследование их остаточной прочности при сжатии после удара по стандарту ASTM D 7137. Установлено, что величина остаточной прочности при сжатии после удара (с энергией  $J=6,67$  Дж на 1 мм толщины) по ММ 1.595-11-113–2001 (на испытательной машине «Z-100») составила 201,6 МПа.

Проведено исследование технологических режимов изготовления ПКМ с квазиизотропной схемой армирования  $[+45/0/-45/90]_s$  на основе ранее исследованного связующего для вакуумного формования и углеродной ткани (углеродное волокно Т-800-НВ) с использованием плакирующих слоев на основе органической ткани. По результатам исследований изменена схема сборки пакета ПКМ для инфузионного формования: укладка распределительной сетки на нижний слой жертвенной ткани с отступом от торцов пакета в 2–3 см; пропитка пакета осуществлялась снизу вверх, что обеспечивало равномерный поток связующего во время пропитки и его равномерное распределение по наполнителю.

Проведена оценка [11] влияния влаго- и топливонасыщения (1 мес) на уровень сохранения прочности при сжатии после ударного воздействия и установлено, что прочность при сжатии после ударного воздействия образцов ПКМ после выдержки 1 мес в воде и в керосине составила соответственно 196 и 184 МПа. Потеря прочности после выдержки в воде составляет 2,48% по сравнению с исходным значением (201 МПа), после выдержки в керосине: 7,46%.

При проведении дальнейших экспериментальных исследований влияния ускоренного влаго- и топливонасыщения в течение 3–5 мес на уровень сохранения прочности при сжатии после ударного воздействия образцов ПКМ с повышенной остаточной прочностью при сжатии после удара, изготовленных инфузионным формованием, получены следующие результаты.

Методом неразрушающего контроля [12, 13] определена площадь поражения ПКМ оптимального состава, обеспечивающего повышенную остаточную прочность при сжатии в результате удара (6,67 Дж на 1 мм) после влаго- и топливонасыщения (топливо ТС-1) в течение 5 мес. Установлено, что область поражения образцов углепластика после воздействия топлива ТС-1 составляет 9,62 см<sup>2</sup>, имеет форму эллипса, глубина поражения в зоне удара 0,88 мм; область поражения образцов углепластика после воздействия влаги составляет 6,60 см<sup>2</sup>, имеет форму эллипса, глубина поражения в зоне удара 0,71 мм. Общая площадь образцов составляет 150 см<sup>2</sup>.



Пример разрушения образца в результате испытаний на сжатие после ударного воздействия (цветом выделена область расслоения после ударного воздействия)

Проведены испытания на прочность при сжатии с заполненным отверстием по стандарту EN 6036. Установлено, что полученные образцы ПКМ (содержание связующего 33,6±4%) имеют уровень прочности при сжатии с заполненным отверстием 390–404 МПа.

Определен уровень сохранения прочности при сжатии после ударного воздействия по ASTM D 7137 образцов ПКМ с квазиизотропной схемой армирования  $[+45/0/-45/90]_s$  (см. рисунок) на основе ранее исследованного связующего для вакуумного формования и углеродной ткани (углеродное волокно Т-800-НВ) с использованием плакирующих слоев на основе органической ткани после влаго- и топливонасыщения. Установлено, что после выдержки в течение 5 мес в воде уровень остаточной прочности при сжатии после удара (6,67 Дж на 1 мм толщины) составил 187–190 МПа, потеря прочности: 8–6% от исходного значения (200–203 МПа). После выдержки в течение 5 мес в топливе ТС-1 уровень остаточной прочности при сжатии после удара (6,67 Дж на 1 мм толщины) составил 178–182 МПа,

потеря прочности: 13–11% от исходного значения (200–203 МПа). Установлено, что после выдержки в течение 5 мес в воде и в топливе ТС-1 влагонасыщение ПКМ с квазиизотропной схемой армирования [+45/0/-45/90]<sub>s</sub> на основе ранее исследованного связующего для вакуумного формования и углеродной ткани (углеродное волокно Т-800-НВ) с использованием лакирующих слоев на основе органической ткани составило 0,776%, топливонасыщение: 0,980%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 231–242.
3. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.
4. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 260–265.
5. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 292–302.
6. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 18–26.
7. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб: Научные основы и технологии. 2009. С. 171–185.
8. Черепанов Г.П. Механика разрушения композиционных материалов. М.: Наука. 1983. С. 32–37.
9. Алексашин В.М., Антюфеева Н.В. Развитие методов термического анализа в исследовании полимерных композиционных материалов /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 345–349.
10. Антюфеева Н.В., Алексашин В.М., Железина Г.Ф., Столянков Ю.В. Методические подходы термоаналитических исследований для оценки свойств препрегов и углепластиков //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №4. С. 18–28.
11. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 41–45.
12. Генералов А.С., Мурашов В.В., Далин М.А., Бойчук А.С. Диагностика полимерных композитов ультразвуковым реверберационно-сквозным методом //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 42–47.
13. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефектоскопия и диагностика полимерных композиционных материалов акустическими методами /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 342–348.

#### REFERENS LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 g. [Strategical Areas of Developing Materials and Their Processing Technologies for the Period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Grashhenkov D.V., Chursova L.V. Strategija razvitija kompozicionnyh i funkcional'nyh materialov [Development Strategics of Composite and Functional Materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 231–242.
3. Muhametov R.R., Ahmadijeva K.R., Chursova L.V., Kogan D.I. Novye polimernye svjazujushie dlja perspektivnyh metodov izgotovlenija konstrukcionnyh voloknistyh PKM [Novel poly-

- mer binders for advanced production methods of structural fibrous polymer composites] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 38–42.
4. Muhametov R.R., Ahmadiyeva K.R., Kim M.A., Babin A.N. Rasplavnye svjazujushhie dlja perspektivnyh metodov izgotovlenija PKM novogo pokolenija [Melt Binders for Advanced Production Methods for PCM of New Generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 260–265.
  5. Hrul'kov A.V., Dushin M.I., Popov Ju.O., Kogan D.I. Issledovanija i razrabotka avtoklavnyh i bezavtoklavnyh tehnologij formovanija PKM [Studies and Development of Autoclave and Autoclave-Free Technologies for PCM Moulding] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 292–302.
  6. Dushin M.I., Hrul'kov A.V., Muhametov R.R., Chursova L.V. Osobennosti izgotovlenija izdelij iz PKM metodom propitki pod davleniem [Characteristic features of manufacturing PC products by the pressure infiltration method] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 18–26.
  7. Perepelkin K.E. Armirujushhie volokna i voloknistye polimernye kompozity [Reinforcing fibers and fibrous polymeric composites]. SPb: Nauchnye osnovy i tehnologii. 2009. S. 171–185.
  8. Cherepanov G.P. Mehanika razrushenija kompozicionnyh materialov [Mechanics of destruction of composite materials]. M.: Nauka. 1983. S. 32–37.
  9. Aleksashin V.M., Antjufeeva N.V. Razvitie metodov termicheskogo analiza v issledovanii polimernyh kompozicionnyh materialov [Development of methods of the thermal analysis in research of polymeric composite materials] /V sb. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnich. sb. M.: VIAM. 2007. S. 345–349.
  10. Antjufeeva N.V., Aleksashin V.M., Zhelezina G.F., Stoljankov Ju.V. Metodicheskie podhody termoanaliticheskikh issledovanij dlja ocenki svojstv prepregov i ugleplastikov [Methodical approaches of thermoanalytical researches for an assessment of properties of pre-pregs and coal plastics] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2012. №4. S. 18–28.
  11. Kirillov V.N., Efimov V.A., Shvedkova A.K., Nikolaev E.V. Issledovanie vlijanija klimaticheskikh faktorov i mehanicheskogo nagruzhenija na strukturu i mehanicheskie svojstva PKM [Testing of climatic factors and the mechanical loading effect upon the polymer composite structure and properties] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 41–45.
  12. Generalov A.S., Murashov V.V., Dalin M.A., Bojchuk A.S. Diagnostika polimernyh kompozitov ul'trazvukovym reverberacionno-skvoznym metodom [Polymer composite diagnostics by the ultrasonic reverberative-through method] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 42–47.
  13. Murashov V.V., Rumjancev A.F. Defektoskopija i diagnostika polimernyh kompozicionnyh materialov akusticheskimi metodami [Defectoscopy and diagnostics of polymeric composite materials by acoustic methods] /V sb. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnich. sb. M.: VIAM. 2007. S. 342–348.